論技術科学

錢學森

（中國科学院力学研究所）

一、科学的歷史發展与技術科学概念的形成

在人們从事生產的过程中，他們必然地累積了許多对自然界事物的經驗。这些經驗可以直接应用到生產上去，也可以先通过分析、整理和总結，然后再应用到生產上去。直接应用这一个方式是工藝的改進，是所謂工程技術，把經驗來分析、整理和总結就是自然科学 *的起源。所以工程技術和科学研究只不过是人們处理生產經驗和对自然界观察結果的兩方面，基本上是同一來源，而且兩方面工作的最終目的也是一样的，都是为了改進現有的和創造更新的生產方法，來丰富人們的生活。

因此在科学發展的早期，我們不能把科学家和工程师分开來。一位物理学家也同时是一位工程师，牛頓就是一个著名的例子。牛頓不但發現了力学上的三大定律，因而奠定了理論力学的基礎，而且他也是一位結構工程师，他設計了一条在英國劍桥大学校址中的木結構桥，这桥据說至今还存在。再像欧拉，他是一个大数学家，同时他对工程結構的穩定問題上也作出了偉大貢献。但是在十九世紀中，当科学在資本主义社会中得到了迅速的發展，科学家的确和工程师分手了。科学家們忙于建立起一个自然科学的完整体系，而工程师們則忙于用在实际工作中所累積了的經驗來改進生產方法。在欧洲的一些学者和科学家，对工程师是看不起的，認为他們是一些有技術，但沒有学問的人。而工程师們又認为科学家是一些不結合实际的幻想者。一般講來，兩方面的人缺乏相互之間的了解和合作。

当然，科学家和工程师分手这种的現象，也是事实上的需要。每一方面的工作因發展而变得更复雜了，工作量也大了，要一一兼顧，自然是不可能的。分工就成为必需的。但是这也不能完全解釋为什么分工之后不能保持緊密的联系，其中必定有更深入的原因。我覺得这原因是：当时科学的發展还沒有达到一个完整体系的階段，自然科学的各部門中虽然有些部分是建立起來了，但另一些部分又确是模糊的，不明确的。这也就是說：当时的自然科学因为它自身还有不少漏洞，还不是一个結实的結構，所以当时的自然科学还不能作为工程技術的可靠基礎，把工程技術完全建筑在它的上面。例如：虽然热力学早已搞得很明白了，可是热力学的基本，也就是用分子的运动來解釋热能現象的統計物理，就存在着許多困難。这些統計物理中的困难要等到量子力学的出現才能得到解决。就因为这些在自然科学中的缺陷，有一些純由理論所推論出來的結果顯然与事实不相符合，这也动搖了工程师們对当时自然科学的信心。所以我們可以完全了解在十九世紀中和二十世紀初年工程师們与科学家中間的隔膜。

但是在本世紀中自然科学的發展是非常快的，个别自然科学的部門在較早的年代也已經达到完整的階段，电磁学和力学便是兩个例子。而正好在这个时候电机工程和航空工程兩个嶄新的工程技術先后出現了。因为它們是当时的新技術，沒有什么旧例和旧經驗可作准則。工程师們为了迅速地建立起这兩門技術就求助于电磁学和力学，用电磁学和力学作为电机工程和航空工程的理論基礎。这样才又一次証明了自然科学与工程技術問題的密切关系，才指明了以前工程师們不重視自然科学的錯誤。而也就是在这个时代，物理学、化学等自然科学学科很快地發展成現代的科学，补足了它們以前的缺陷。所以在今天來看，我們对物質世界的認識，只要是在原子核以外，只要除开个别几点，是基本上沒有問題了。在原子和分子世界中，有量子力学；在日常生活的世界里，有牛頓力学；在大宇宙的世界里，有一般相对論的力学。只有原子核內部的世界現在还沒有一定的看法。因此我們也可以說，对工程师說來，自然科学現在已經很完整了，它已經是一切物質世界（包括工程技術在內）的可靠基礎。

由这个事实出發，有許多科学家認为：一切工程技術可以看作是自然科学的应用，而一个工程师的培养只要在他的專門業务課程之外，再加上自然科学就行了，就可以保証他在以后工作中有解决新問題和克服困难的能力。在四十几年前的美國，他們的确是这样看法。有名的麻州理工学院就是建立在这个原則上的。把工程师的培养和技術員的培养分开來，把工程师作为一个科学的应用者，这在当时是一个帶有革命性的改革。这个改革在一定程度上是成功的，而这种

* 在这里，自然科学这一名詞是用來包括数学、物理学、化学、以及生物学、地質学等科学。但是自然科学不包括工程技術。

培养工程师的方法也就被其他学校和其他國家中的工程技術学校所採用，逐漸成为一种典型的工程技術教育。由这种課程所培养出來的工程师比起老一輩的工程师來，的确有科学分析的能力，在許多困难的問題上不再完全靠經驗了，能用自然科学理論來帮助解决問題。但这不过在一定程度上如此，至于課程改革原來的目的：把工程技術完全建立在自然科学的基礎上的这个目的，是沒有完全实現的。我們先看一看課程的組成。这种課程是四年制，前兩年着重在自然科学，后兩年着重專門業务。但是这兩部分之間沒有能結合起來。有人說以这个办法受教育的学生，前兩年他是一个学者，追求着自然界的眞理，运用理論的分析而且做嚴密的实驗，确是在高度学術空气中生活着的。但是一过了兩年，進入了后一階段的教育，他又忽然从学術空气中被赶出來，進入了工程师們所習慣的園地，放棄了分析方法，去研究經驗公式了。我們知道这样培养出來的工程师一進入到实际工作中，不久就把他們学过的自然科学各个学科的大部分都忘了，数学也不大会用了，只不过还会运用自然科学的一般原則來帮助他們的思考罢了。要眞正以科学的理論來推演出他們在工作中所需要的准則，他們还是不能做到的。

其实这一种困难是可以理解的。因为美國麻州理工学院对工程技術的看法是有錯誤的地方的。錯誤在什么地方呢？我們可以这样看：自然科学的研究对象並不是大自然的整体，而是大自然中各个現象的抽象化了的、从它的环境中分离出來的东西。所以自然科学的实質是形式化了的、簡單化了的自然界。因此，虽然关于原子核以外的世界，現在已經發現了許許多多的自然規律，但究竟自然科学还是要不断的發展的。在任何一个时代，今天也好，明天也好，一千年以后也好，科学理論决不能把自然界完全包括進去。总有一些东西漏下了，是不屬于当时的科学理論体系里的；总有些东西是不能从科学理論推演出來的。所以虽然自然科学是工程技術的基礎，但它又不能够完全包括工程技術。如果我們要把自然科学的理論应用到工程技術上去，这不是一个簡單的推演工作，而是一个非常困难、需要有高度創造性的工作。我們說科学理論应用到工程技術上去是不合適的，应該更确当地說科学理論和工程技術的綜合。因此有科学基礎的工程理論就不是自然科学的本身，也不是工程技術本身；它是介乎自然科学与工程技術之間的，它也是兩个不同部門的人們生活經驗的总和，有組織的总和，是化合物，不是混合物。

顯然，我們不可能要求一个高等学校的学生僅僅用四年的功夫把这个非常困难的工作做好。他們最多只不过能把科学和工程混在一起，决不能讓兩者之間起化合作用，所以美國麻州理工学院式的教育决不能完全达到它予期的目的，要作綜合自然科学和工程技術，要產生有科学依据的工程理論需要另一种專業的人。而这个工作內容本身也成为人們知識的一个新部門：技術科学。它是从自然科学和工程技術的互相結合所產生出來的，是为工程技術服务的一門学問。

由此看來，为了不断地改進生產方法，我們需要自然科学、技術科学和工程技術三个部門同时並進，相互影响，相互提攜，决不能有一面偏廢。我們也必須承認这三个領域的分野不是很明晰的，它們之間有交錯的地方。如果从工作的人來說，一人兼在兩个部門，或者甚至三个部門是可以的；那末一个技術科学家也可以同时是一个工程师；一个物理学家也可以同时是一个技術科学家。不但如此，这三个領域的界限不是固定不移的，現在我們認为是技術科学的东西，在一百年前是自然科学的研究問題，只不过工作的方法和着重是有所不同罢了。我們要明确的是：在任何一个时代，这三个部門的分工是必需的，我們肯定地要有自然科学家，要有技術科学家，也要有工程师。

二、技術科学的研究方法

既然技術科学是自然科学和工程技術的綜合，它自然有不同于自然科学，也有不同于工程技術的地方。因此，研究技術科学的方法也有些地方不同于研究其他学科的方法。

因为技術科学是工程技術的理論，有它的嚴密組織，研究它就离不了作为人們論理工具的数学。这个工具在技術科学的研究中是非常重要的，每一个技術科学的工作者首先必須掌握数学分析和計算的方法。也正因为如此，某一些技術科学的發展，必定要等待有了所需的数学方法以后才能進行，例如近几十年來統計数学的成就就使得好几門技術科学（例如控制論和运用学）能够建立起來，所以作为一个技術科学工作者，除了掌握現有的数学方法以外，还必須經常注意数学方面的發展，要能灵敏地認出对技術科学有用的新数学，快速地加以利用。他也要不时对数学家們提出在技術科学中發現的数学問題，求得他們的协助，來解决它。自然我們也可以說，关于这一点，技術科学与自然科学各部門的研究沒有什么大的差別。但是实际上技術科学中的数学演算一般要比自然科学多，数学对技術科学的重要性也就更明顯些。也因为技術科学中数学計算多，有时多得成了工作量中的主要部分，这使得許多技術科学的青年工作者誤認为数学是技術科学的关鍵。他們忘了数学只不过是一个工具，到底不过是一个“宾”，不是“主”。因此我們可以說：一件好的技術科学的理論研究，它所用的数学方法必定是最有效的；但我們决不能反过來說，所有用高深

数学方法的技術科学研究就都是好的工作。

也是因为技術科学研究工作中，用数学分析和計算的地方很多，所以許多具体分析与計算的方法，像攝动法、能量法等，都是技術科学研究中所創造出來的。这方面供献特别多的是技術科学中的一个部門——力学。唯其如此，最近电子計算机的發展，就对技術科学的研究有深切的影响。因为电子計算机能以从前不可想像的速度進行非常准确的計算，有許多在以前因为計算太复雜而用实驗方法來解决的問題，現在都可以用計算方法來解决了，而且在时間方面以及所需的人力物力方面都可以比用实驗方法更經济。这一点說明了电子計算机在技術科学研究中的重要性。在將來，我們不能想像一个不懂得用电子計算机的技術科学工作者。但更要緊的是：由于电子計算机的創造，数字計算方法將更加多用，技術科学的研究方法將起大的变化。我們才在这改革的萌芽时期，而且电子計算机本身也在迅速地發展，將來到底能做到什么地步，現在还不能肯定，能肯定的是：下一代的技術科学工作者的工作方法必定比我們这一代有所不同。

我們在前面已經說过：数学方法只是技術科学研究中的工具，不是眞正关鍵的部分。那么，关鍵的是什么呢？技術科学工作中最主要的一点是对所研究問題的認識。只有对一个問題認識了以后才能开始分析，才能开始計算。但是什么是对問題的認識呢？这里包含确定問題的要点在哪里，什么是問題中現象的主要因素，什么是次要因素；哪些因素虽然也存在，可是它們对問題本身不起多大作用，因而这些因素就可以略而不計。要能做到这一步，我們必須首先做一些予备工作，收集有关研究題目的資料，特别是实驗数据和現場观察的数据，把这些資料印入腦中，記住它，为做下一階段工作的准备，下一个階段就是眞正創造的工作了。創造的过程是：运用自然科学的規律为摸索道路的指南針，在資料的森林里，找出一条道路來。这条道路代表了我們对所研究的問題的認識，对現象机理的了解。也正如在密林中找道路一样，道路决难順利地一找就找到，中間很可能要被不对头的踪跡所誤，引入迷途，常常要走回头路。因为这个工作是最緊張的，需要集中全部思考力，所以最好不要为了查資料而打断了思考过程，最好能把全部有关資料記在腦中。当然，也可能在艰苦工作之后，發現資料不够完全，缺少某一方面的数据。那么为了解决問題，我們就得暫时把理論工作停下來，把力量轉移到实驗工作去，或現場观察上去，收集必需的数据資料。所以一个困难的研究題目，往往要理論和实驗交錯進行好几次，才能找出解决的途徑。

把問題認識清楚以后，下一步就是建立模型。模型是什么呢？模型就是通过我們对問題現象的了解，利用我們考究得來的机理，吸收一切主要因素、略去一切不主要因素所制造出來的"一幅圖画"，一个思想上的結構物。这是一个模型，不是現象本身。因为这是根据我們的認識，把現象簡單化了的东西；它只是形象化了的自然現象。模型的选擇也因此与現象的內容有密切关系。同是一个对象，在一个問題中，我們着重了它本質的一方面，制造出一个模型。在另一个問題中，因为我們着重了它本質的另一面，也可以制造出另一个完全不同的模型。这兩个不同的模型，看來是矛盾的，但这个矛盾通过对象本身的全面性質而統一起來。例如，在流体力学中，在一些低速流动現象中，空气是被認为不可压縮的，無粘性的。在另一些低速流动現象中，因为牽連到附面層現象，空气又变为有粘性的了。在高速流动現象中，空气又变成可压縮的了。所以同是空气，在不同的情况下，可以有不同的模型。这些互相矛盾的模型都被空气的本質所統一起來。

我們已經說过，在摸索問題关鍵点的时候，我們依靠自然科学的規律。这也說明技術科学的工作者必須要能徹底掌握这些客观規律，必須知道什么是原則上可行的，什么是原則上不可行的。譬如永动机就是不可行的。我們也可以說唯有徹底掌握了自然科学的規律，我們的探索才能不盲目，有方向。正如上面所說的，自然科学的規律是技術科学研究的指南針。

有了模型了，再下一步就是分析和計算了。在这里我們必須运用科学規律和数学方法。但这一步是"死"的，是推演。这一步的工作是出現在科学論文中的主要部分，但它不是技術科学工作中的主要創造部分。它的功用在于通过它才能使我們的理解和事实相比較；唯有由模型和演算得出具体数据結果，我們才能把理論結果和事实相对比，才可以把我們的理論加以考驗。

由前面所說的技術科学工作方法看來，也許有人要問：技術科学的研究方法又有什么和自然科学研究方法不同的地方呢？我們可以說这里沒有絕对的差别，但是有很重要的相对差别。我們可以說以自然科学和工程技術來对比，工程技術里是有比較多的原始經驗成分，也就是沒有嚴密整理和分析过的經驗成分。这些东西在自然科学里一般是很少的，就是因为某一問題分析还不够成熟，不可避免地含有經驗成分，那也是自然科学家們要努力消除的。但在技術科学里就不同了。它包含不少的經驗成分，而且因为研究对象的研究要求的不同，这些經驗成分总是不能免的。因此这也影响了技術科学的研究方法，它在一定程度上是和自然科学的研究方法有所不同的。我們也可以从另

一个方面來說，技術科学是从实踐的經驗出發，通过科学的分析和精煉，創造出工程技術的理論。所以技術科学是从实际中來，也是向实际中去的。它的主要的作用是从工程技術的实踐，提取具有一般性的研究对象，它研究的成果就对那些工程技術問題有普遍的应用。也正因为如此，技術科学工作者必須經常和工程师們联系，知道生產过程中存在的实际問題。有时一个技術科学工作者也直接参加解决生產中發生的問題，以取得实踐的經驗。照这样說，一个技術科学工作者的知識面必然是很廣闊的，从自然科学一直到生產实踐，都要懂得。不僅知識廣，而且他还必須要能够灵活地把理論和实际結合起來，創造出有科学根据的工程理論。

有了工程理論，我們就不必完全依賴工作經驗，我們就可以予見，这正如有了天体力学的理論，天文学家們就可以予見行星的运动，予告日蝕、月蝕等天文現象。由这一点看來，工程理論又是新技術的予言工具。因而技術科学也能領導工程技術前進，是推進工程技術的一股力量，是技術更新、創造新技術所不可缺的一門学問。

三、力学与航空技術

我們現在举一个技術科学对工程技術所起作用的实例：航空技術。在这里起重要作用的是力学这一个技術科学，这我們在前面也已經講到。力学对航空技術的貢献是有决定性的，是技術科学与工程技術相互作用的典型。力学本身也就成为技術科学的一个范例，也是我們現在对技術科学这一个概念的來源。

在古典的力学中有兩个重要的分支：一个是流体力学，一个是固体力学。流体力学是处理液体和气体的运动的，所以它也包括了气体动力学和空气动力学。固体力学是处理固体在外力或加速度作用情况下所產生的应力应变，所以包括了彈性力学和塑性力学。顯然，流体力学与飛行器的外形設計和推進問題有密切关系，而固体力学則与飛行器的結構設計有密切的关系。自然我們認識到流体力学也必然与許多其他工程技術有关系，像水利工程、蒸汽或燃气渦輪，船舶的設計等。固体力学也必然与所有工程技術中結構强度問題有关系。但是因为在力学迅速發展的时期中，也就是过去这五十年，只有航空技術上的問題最迫切，最嚴重，所以与力学相互作用最强的是航空技術，而不是上面所說的其他工程技術。

在飛机設計中一个基本問題是升力和阻力。升力是飛行所必需的，然而有升力就必然產生阻力；怎么样才能在一定升力下減少阻力呢？这也等于問：什么是一定升力所產生的最小阻力呢？流体力学的偉大科学家 L. 普郎特耳在受了蘭开斯特耳意見的影响下，創造了著名的有限翼展机翼理論，給出了計算由升力所產生的阻力的方法，这就是所謂感生阻力公式。普朗特耳的研究也指出了減少阻力的方法，他的公式說明在一定升力系数下，感生阻力系数是与翼展比成反比例的。因此要減少感生阻力，我們就应該加大翼展比，也就是把翼面作得狹而長。

感生阻力的問題解决了，接着下面的問題就是不由升力所產生的阻力了，也就是所謂寄生阻力。这一部阻力是由于空气的粘性而來的。空气的粘性很小，但是它並不等于零。怎么样來考慮小粘性所產生的作用呢？这也是流体力学对航空技術的一个大貢献。它指出小粘性的作用是局限于附在表面一層气流中，也就是附面層中。流体力学也給出分析附面層的方法；並且指出：附面層有时会因为沿着表面在流向压力增加，感到运动的阻碍，因而从表面分离出去。这样分离了的附面層就造成渦流，減少了升力，加大了阻力。这些流体力学上研究的結果不但給設計飛机翼形和飛机艙形以原則性指導，而且指出，要減少寄生阻力，我們就必須減小附面層的面積，也就是減少表面面積。由于这一結果，飛机的設計才由多翼面的、帶支柱的外形，走向單翼面、完全流綫型化了的外形。

制造完全流綫型化的單翼飛机，不能再用不够坚固的旧的、鋼架蒙布式的結構，而必須改用全金屬的薄壳結構。但是这是一种新型的結構，工程师們沒有足够的經驗，要能設計出有高效能的結構，这还是要請教彈性力学家們。他們首先給出計算薄壳結構的折屈負荷或臨界負荷的方法，也就是解决彈性穩定問題。虽然早在十九世紀欧拉就研究过这个問題，給出細長柱臨界負荷的公式；但是飛机上用的結構要比这复雜得多，而且薄壳是有表面曲度的，古典的、所謂小撓度理論是不正确的，它給出过高的臨界負荷。在另一方面，有些表面曲度小的結構，虽然折屈了，但是仍然能担起更大的負載。所以彈性力学家們也还研究了結構在超越臨界負荷的情况，也就是解决了所謂“有效寬度”的問題。这一連串的研究都是在 1933 年前后作的，因此奠定了全金屬飛机結構的理論基礎。

在这里我們必須說明的是：結構强度的問題終究是要牽連到材料破坏問題上去的，因为强度就是在破坏的时候的負載，而且对金屬材料來說，在未破坏以前，也必先進入塑性变形階段，因此也要牽連到塑性力学的問題。一直到現在，材料强度問題与塑性力学問題都在研究着，但都还沒有得出定論。所以自然科学的已知規律顯然还不能完全包括工程技術上的現象。但是力学工作者並不因此而放棄对結構强度問題的研究。他可以一面用彈性力学的理論，一面吸取工程实踐上的經驗或实驗的結果，把它們綜合起來，

造出有科学根据而又有实际意义的結構理論，这种在現实条件下爭取有用的理論的精神，是技術科学工作者所不可缺的。

由于上面所說的这些發展，在第二次世界战爭中，飛机的时速已經达到了700公里，接近了声音傳播的速度（約每小时1000公里）。当时因为初步实驗上發現物体阻力在声速附近急驟加大，在工程师中間也有人以为要飛机超过声速是不可能的，說存在着声速的牆。就在这时候，「气体动力学家們作出了翼面和机身在超声速气流中的运动理論，設計了超声速的風洞，作了許多超声速气流的实驗。」他們用理論和实驗双方並進的方法証明超声速飛机的阻力系数实际上不会太大，所以並沒有所謂声速的牆。在另一方面，气体动力学家也参加了噴气推進机的創造和發展，大大地增高了飛行推進机的效能，因而減少它的重量。力学家的这些貢献，促成了超声速飛行的实現。这一关一打破，航空的發展更快了。現在流体力学家正在努力于高超声速气动力学和稀薄气体动力学的研究，帮助超高空、超高速飛行的实現；因而也在促進星际航行的誕生。

『因为技術科学的研究对象是具有一般性的，它的研究成果也有廣泛的应用。力学的工作，虽然是由于航空技術迫切的要求，但是，現在已經得到的流体力学和固体力学的研究結果，对其他工程技術部門來說也有很大的帮助。例如燃气輪机的創制成功是离不开气体动力学的；而掌握了高速气流动力学以后，我們也就很自然地看到把高速化学反应用到化学工業中去的可能性。这些力学在航空技術以外的应用对將來的工程技術都是非常重要的。它也說明了，通过技術科学研究中的总結，一个技術部門的經驗与成就就能超越它們的局限性，伸展到其他方面去，推進了另一些技術部門的發展。技術科学家也是利用这一可能性來予見新技術，指出工程技術下一階段的發展方向。

四、技術科学的一些新發展方向

我們在上一節中，約略地介紹了些几門技術科学的情況。但是流体力学、彈性力学和塑性力学都是比較成型的，已經有了不少工作的学科；現在，我們要談一談今后技術科学發展的几个方向，几个需要开拓的学科。为了簡明起見，我們制了一張表。表的第一欄是学科的名称。第二和第三欄是这个学科在自然科学抽用的部分和在技術經驗方面抽用的部分。这也就形成这个学科的資料，要从这兩部分綜合起來創造出这門技術科学。第四欄是現在可以看出來的內容，也就是研究題目。第五欄是这門学科研究成果的应用，也因此可以表現出这門科学的重要性。我們从这个表里面可以看出第三欄的技術經驗組成部分和第五欄的应用方面常常是相同的，这又一次說明技術科学基本上是从工程技術上來，到工程技術中去的学科。

这張表也許太簡單了，我們再來介紹一下各学科的大意。

化学流体力学　这是一門研究流体中有化学变化、热的發生和吸收的动力学。因为有化学变化，所以流体各部分的成分就不能一样，成分不一样就引起了各种擴散过程。自然，因为有热能的發生和吸收，也有溫度的不均勻性，有热傳導的問題。所以它基本上是一門比流体力学还要复雜的科学。

物理力学　这門技術科学的目的是由物質的微結構，原子、分子的性質，通过統計物理的方法來計算物質的宏观性質，这里也包含材料强度的物理理論。这也就是說我們希望用計算的方法來得到工程用的介質和材料的性質。这是一个節省时間、人力和物力的很上算的方法。虽然近代物理和化学的成就是很大的，但是要完全靠它們來推演出物質的宏观性質还是不可能的，在許多地方，我們要採用半理論半經驗的方法來解決問題。这也說明了物理力学的內容和研究方法与統計物理、物理化学、化学物理是有所不同的。物理力学要在这些自然科学的基礎上，更進一步地結合实际，求对工程技術有用的結果。

电磁流体力学　这是研究導电液体和气体在电磁場中的动力学。導电的液体是液体金屬，它們在核子反应堆中常常被用为冷却剂。要傳送液体金屬可以用一种电磁泵，泵里面完全沒有轉动的机件，只靠轉动的电磁場來推动液体金屬。導电的气体是离子化了的气体，也就是高溫的气体（在一万度以上的高溫）。这种高溫在超高速飛行器的附面層里可以出現；这里的問題是怎样才能有效地冷却表面，不使它的溫度过分昇高。

流变学　流变学研究特別液体的动力学。这类液体的应力应变关系要比普通液体（像水）复雜得多，它包括膠体、油漆等。这門技術科学已經有多年的歷史，只不过这方面的工作做得不够。譬如一方面我們可以用仪器测定油漆的各种性質，一方面我們对油漆也有些具体的要求，像用刷子刷上油漆，过后要不顯刷子的印跡。但是現在的流变学就还不能把这兩件事連起來，明确要什么样的物理性質才能滿足具体要求。要做到这样，就是流变学今后發展的主要方向。

土和岩石力学　我國現在正在進行大規模的基本建設，在土石工程中累積了不少經驗，在大爆破作業中也学会了先進操作方法。但这些都还沒有作出科学的总結，創造出土壤和岩石移动工程的理論，这是不应該的，土和岩石力学的研究任务就是要补足这个缺陷。此外我們也要研究电流对土壤的影响，土壤中的电滲問題等。

技術科学的几个發展新方向

部門学科	組成部份		研究的内容	成果的应用
	自然科学和技術科学方面	工程技術方面		
化学流体力学	1.流体力学，气体动力学 2.化学动力学	1.化学工業 2.冶金工業 3.工業中燃燒裝置	1.有化学变化的流体运动 2.固定和流体化的触媒床 3.燃燒和爆震 4.冲激管中的化学作用	1.化学工業 2.冶金工業 3.工業燃燒問題 4.内彈道問題
物理力学	1.物理化学，化学物理 2.量子力学，統計物理 3.固体物理	1.化学工業 2.材料研究	1.气体、液体、固体的热工性質 2.固体材料强度及变形問題 3.物質在不可逆过程中的性質 4.气体在超高温中的性質	1.一般工程技術 2.高温技術
电磁流体力学	1.流体力学 2.电磁学 3.电子物理 4.天文观測	1.超高速飛行技術 2.原子能技術	1.电磁流体的运动規律	1.超高速飛行技術 2.原子能技術
流变学	1.流体力学	1.油漆、食品工業等 2.高分子化合物工業	1.流变体測量方法的分析 2.流变体运动規律	1.輕工業生產技術和輕工業產品的改進 2.超高压滑潤剂和軸承
土和岩石力学	1.固体动力学，固体力学 2.强度理論	1.挖土工程 2.隧道工程 3.爆破工程 4.採礦工程	1.土和岩石的物理性質 2.爆破的动力学过程 3.土壤加固問題	1.土石工程 2.採礦工程 3.爆破工程 4.挖土机械的設計
核子反应堆理論	1.核子物理，中子物理 2.热傳導	1.原子能利用	1.反应堆理論，反应堆动态性能	1.原子能利用
工程控制論		1.随伺机械，工業控制系統 2.自动化生產方法	1.各种控制系統的分析和綜合 2.自动測量的系統 3.自动校正的系統	1.工業控制系統 2.生產过程自动化
計算技術	1.数理邏輯 2.控制論	1.自动控制系統 2.电子工藝学	1.模拟計算机 2.数据計算机 3.复合計算机	1.科学問題的計算 2.自动控制系統
工程光譜学	1.物理光学，各种光譜 2.量子力学，統計物理	1.工業分析仪器	1.光譜分析 2.質譜分析 3.輻射在不均匀气体混合物中的規律	1.工業分析 2.生產过程自动化中的控制測量
运用学		1.工程經济 2.經济規則 3.运輸規則 4.生產規則	1.綫形規則，动态規則 2.运輸綫問題 3.排隊問題	1.工程經济 2.經济規則 3.运輸規則 4.生產規則 5.產品系列化問題

核子反应堆理論　这門技術科学的内容是設計核子反应堆的理論，几年來这方面的工作一直是核子物理学家兼任的，現在应該把这部分工作計划为技術科学的一个部門，不再去麻煩物理学家。

工程控制論　这是生產过程自动化和自动控制系統的基礎理論。它比一般所論自动調節和远距离操縱理論的范圍要廣，而它也正在引用最近系統数学的成就來更進一步擴大它的領域，为設計更完善的自动控制系統打下基礎。

計算技術　这学科是为了設計更好的、多种多样的电子計算計，和更有效地使用电子計算机。現在在这一个方面工作的有無綫电电子工程师、电路網絡專家，也有計算数学專家和数理邏輯家。如果只把这些不同專業的人放在一起，他們只形成一个“混合物”，是不会有效地共同工作的。只有当这几方面的專家互相了解，互相貫通了他人的專業以后，也就是說結合起來成了“化合物”以后，这才能推進电子計算机的發展，作到这一步也就是把他們各个不同的專業变成一个共同的專業——計算技術这一門技術科学。

工程光譜学　要把生產过程自动化，就要能迅速

地、精确地知道生產过程每一部分的情況，作为控制的依据。在許多化学工業、冶金工業和燃燒过程中，最主要的测定就是物質成分的分析。最快最准的測定方法就是光譜分析法和質譜分析法，而且这些分析的一套仪器也能自动化，不經过人的操作，就能將分析的結果傳輸到过程的控制系統中去。怎么样來設計这种自动仪器？这需要理論。此外，現在我們只知道怎样处理均匀气体的光譜，如果我們更進一步处理不均匀气态的光譜，像一个火焰的光譜，用这样的光譜分析出其中每一点的不同成分，那就需要更進一步來發展光在物質中傳導的理論。这些問題就是工程光譜学的研究对象。

运用学　这門技術科学工作的內容是用近代数学的成就，特别是統計数学的成就，來研究最有效地使用人力、生產工具、武器、物資等等的方法和安排，也就是把一切規划工作放在科学的基礎上。自然，以前作規划工作的人們也引用了些数学，但是因为用的数学方法是很初級的，工作的范圍受了很大限制，所以不能够徹底解决問題。运用学就是要用最有效的数学方法來突破这个限制，創造出作規划的一般方法，建立起規划的理論。我們可以看到，运用学研究中所出現的因素与一般科学有所不同。它不研究物質的能量和动量，也沒有什么动力学問題。运用学專考究一个組織、一个系統的运用效果，和組織間与系統間的消長关系。

我們在附表里和前面各節中介紹了些技術科学的發展新方向，有的是新的学科，有的是老学科但是要朝新的方向走。这里必須說明的是，由于个人知識的限制，我不可能把所有發展的方向都罗列出來，列出來的是不完全的，而其中有一半是和力学有关的。顯然还有許多别的学科沒有列出來，举一个例，現在物理学家研究半導体，但是他們研究的重点是半導体在电子器件和电力技術上的应用，所以这样的一門学科实在是一門技術科学。此外也很顯然地，說这些是發展的新方向，並不等于說老一点的技術科学部門就沒有前途，不必發展了。人們的知識是要永远前進的，不会走到終点的。而且任何在这些旧部門工作的人，任何流体力学家、彈性力学家、塑性力学家，都知道在他們自己專業里面还存在着一連串的問題等待解决，这些問題也对工程技術有密切关系，不容忽視。

五、技術科学对其他科学的貢献

我們在前面已經提到自然科学、技術科学和工程技術之間的相互影响和相互提攜，这也就是說，我們不能只看到自然科学作为工程技術的基礎这一面，而忽略了反过來的一面，一个反饋作用，也就是技術科学对自然科学的貢献。为什么有这一个可能性呢？我們在第一節里就說明为什么自然科学是不可能尽善尽美的，不可能把工程技術完全包括進去；而技術科学却能把工程技術中的宝貴經驗和初步理論精煉成具有比較普遍意义的規律，这些技術科学的規律就可能含有一些自然科学現在还沒有的东西。所以技術科学研究的成果再加以分析，再加以提高就有可能成为自然科学的一部分。这里的一个明顯例子就是工程控制論。工程控制論的內容就是完全从实际自动控制技術总結出來的，沒有設計和运用控制系統的經驗，决不会有工程控制論。也可以說工程控制論在自然科学中是沒有它的祖先的。但是工程控制論一搞出來，我們很容易看到它的应用並不局限于人为的控制系統。在自然界里，生物的生長和生存都有它們自己的相应控制系統；而这些自然控制系統的运行規律也是依照工程控制論中的規律的。所以工程控制論中的一些規律，必然是更廣泛的控制論的一部分，而这个更廣泛的控制論就是一切控制系統（人为的和自然的）的理論，它也必然是生物科学中不可缺少的，是生物科学的一部分。現在有些人認为从前生物科学家因为沒有控制論这一工具，所以只看到了生命現象中的能量和物質运动問題，沒有注意到更关鍵的控制問題，因而歪曲了实际，得不到深入的了解。由此看來，一門技術科学，工程控制論，对一門自然科学，生物科学，是有非常重要的貢献的。

其实技術科学对其他科学的貢献还不限于自然科学。我們來看一看运用学。这門学科也是在自然科学領域里沒有祖先的。它是由于改進規划工作的实际需要而產生的。規划工作中的工程經济、运輸規划还可以說是工程技術，而生產規划就已經有点出了工程技術的范圍，部分地踏入社会科学的領域中去了。現在运用学的歷史还太短，內容还不丰富，但是我們肯定，再过些时候，当运用学有了進一步的發展以后，它的应用范圍必定会更擴大，会更向社会科学部門伸展。我們这样說是有原故的。考慮一下社会科学中的一个重要部門的政治經济学对社会主义部分有些什么研究的題目，这里有关运用学的至少有下列几个：

（一）國民經济各部門間的关系，也就是生產生產資料的部門和生產消費資料的部門之間的关系，工農業生產部門和交通运輸部門之間的关系，生產部門和商業部門、物資供应部門、財政金融部門等等之間的关系。

（二）各地区間的关系，也就是在一个社会主义國家里面，因为各个地区人口条件和自然条件的差別，造成在某种程度上的地区相对獨立性，不可能每一地区都完全平衡，每一地区都和其他地区有同样的發展程度，这里就產生了地区間的关系。

（三）社会主义國家和别的國家的經济关系，也就是社会主义國家之間的关系和社会主义國家与資本主义國家之間的关系。

上面这一些經济关系的分析和研究可以用一个运用学里面的工具，綫性規划來進行。自然，綫性規划是一个初步的近似解法，但是运用学的發展自然会創造出更好的工具，像非綫性規划和动态規划。所以我們相信一門技術科学，运用学，对政治經济学会作出很大的貢献。把政治經济学精确化，也就是把社会科学从量的側面來精确化。

在这里我想应該附加一个說明。許多人一听見要把社会科学精确化一定会有意見，就要提出抗議說：社会科学是碰不得的，自然科学家也好，技術科学家也好，你們都請站开！我想这大可不必，但所以有些人会对社会科学的精确化有这样反应，也不是沒有一定的理由。可能是因为怕如此一精确化，反而把社会科学搞坏了。在資本主义國家中也的确有一批所謂度量經济学*（Econometrics）家，他們的大本营在美國的芝加哥，目的是把数学的分析方法应用到經济学上去。他們已經搞了几十年了，但是沒有搞出什么好結果，沒有能解决經济上的什么問題。这是証明了經济学不能精确化嗎？我想不是的。这些度量經济学家們的出發点是資本主义不正确的經济学說。用資本主义的不正确观点，怎样会得出与实际相符合的結果呢？如果度量經济学家成功了，那我們倒反而要担心了。我們知道引用数学不会把原則上不正确的东西变成正确，也不会把原則上正确的东西变成不正确，数学只是一个工具，一个加快我們运算的工具，使得我們的分析能够更深入，更精确。所以我們沒有理由怕社会科学会因引用数学方法而搞坏了。

另一个对社会科学精确化的顧慮是怕社会現象中有許多因素不能确实的估計，因而認为精确化是不可能的。不能确实估計的因素可以在兩种不同情况下出現，一种是統計資料不够；一种是因素本身确是不易予見的，例如工人劳动積極性。前一种情况是不应該有的，眞正的困难倒是因为不採用数学分析方法，所以难以确定那一个統計数字是重要的，因而統計資料有不切实用的情形。至于第二种情况，因素的可能变动大，不易固定，我想也不是放棄精确化社会科学的理由；誰都承認社会科学不是毫無客观規律的学間，只要有規律，这些規律就可以在一定程度上用数來描述出來。如果一个因素不能固定，我們也可以不固定它，把它当作一个有某种統計性質的"随机变数"，也就是說标明这个因素不同数值的几率是什么，整个問題的演算仍然可以精确的進行。而且近代統計数学方面的發展，我們完全有条件來处理这种非决定性的运算，只不过計算的結果不是一定的某种情况，而是精确地算出各种不同情况的出現几率是什么。这对規划工作來說是正确的答案。而其实一件在起初認为不能用数字來描述的东西，只要我們这样地來做，我們就發現，通过这个工作能把我們的概念精确化，把我們的認識更推深一步。所以精确化不只限于量的精确，而更重要的一面是概念的精确化。而終了因为达到了概念的精确化也就能把量的精确化更提高一步。

再有一个反对把社会科学精确化的理由是說：社会現象中的因素如此之多，关系又如此之复雜，数学的运算怕是不能实行的。其实这一个理由現在也不成立了。現在我們已有了电子計算机，它的計算速度，远远超过人的計算速度，因此我們处理复雜問題的能力提高了千万倍，我們决不会只因为計算的困难而阻碍了我們的研究。

由此看來，我們沒有理由反对把精密的数学方法引入到社会科学里。但是到底这样精确化又有什么好处呢？举个例：精确化了的政治經济学就能把國民經济的規划作得更好，更正确，能使一切規划工作变成一个有系統的計算过程，那么就可以用电子計算机來帮助經济規划工作，所以能把規划所需的时間大大地縮短。也因为計算並不費事，我們就能經常的利用实际情报，重新作規划的計算，这样就能很快地校正規划中的偏差和錯誤。我們甚而至于可以把整个系統放到一架电子計算机里面去，直接把新的統計資料傳入計算机，把計算机作为經济系統的动态模型，那就可以經常不断的規划，經常不断的校正，这样一定能把經济規划提到远超过于現在的水平。所以我們可以想像得到，通过了运用学把数学方法引用到社会科学各部門中去，我們就能把社会科学中的某些問題更精确地、更具体地解决。当然，也許現在的社会科学家們会認为这样就把社会科学弄得不像社会科学了，但是所以"不像"，卽正是因为有了新的东西，有了更丰富的內容，正是因为社会科学里產生了新的部門，这有什么不好呢？

六、謝語

作者在寫这篇論文的时期中，把內容的一部或全部和中國科学院及中國科学院力学研究所的許多位同事討論过。因为有了这些討論，起先說得不清楚的地方說得更明白些了；起先說得不妥当而容易引起誤解的地方也就修正了。作者在这里对他們給的帮助謹致謝意。

* 也有人把 Econometrics 譯作技術經济，但是从它的內容來看，这个譯名可能是不合適的。